

Les sols sur roches cristallines formés sous climat sub-tropical humide au Brésil

Boris VOLKOFF*, Adolpho J. MELFI** et Carlos C. CERRI***

*Mission ORSTOM-Université de Sao Paulo, Instituto de Geociências da USP, C.P. 20899, Sao Paulo-Brésil.

**Université de Sao Paulo, Instituto de Geociências da USP, C.P. 20899, Sao Paulo - Brésil.

***Université de Sao Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, C.P. 96, Piracicaba, Sao Paulo - Brésil.

RÉSUMÉ

Au Brésil, au sud du 30^e parallèle commence le domaine de la prairie. Ce domaine, climatiquement et géologiquement assez varié, inclut une grande partie du massif cristallin du Rio Grande do Sul où le climat, de type sub-tropical de transition vers les climats tempérés, est caractérisé par une pluviométrie de 1.500 mm bien répartie sur l'ensemble de l'année. Les sols de cette région sont relativement humifères et présentent des analogies avec les brunizems connus, non loin là, en Uruguay et en Argentine. L'étude détaillée de la minéralogie, de l'humus et de l'état du complexe absorbant de quelques profils types, montre que l'on a affaire en réalité à des sols fersiallitiques désaturés où l'accumulation humifère est la conséquence de l'acidification et de la forte aluminisation des horizons superficiels. L'argilogenèse est d'autre part importante. Sur granites, il se forme de la kaolinite presque exclusivement alors que, sur roches-mère gneissiques, apparaît une association kaolinite, vermiculite, smectite; dans ce cas, la smectite est instable, la kaolinite et la vermiculite se maintiennent seules dans le sol. L'humus est peu polymérisé et relativement mobile. L'acidité est généralement forte. L'aluminium individualisé se trouve sous forme échangeable et sous forme complexée par l'humus. Il y a aussi toujours aluminisation des espaces interfoliaires des argiles 2/1.

ABSTRACT

CRYSTALLINE ROCK DERIVED SOILS, FORMED UNDER HUMID SUBTROPICAL CLIMATE IN BRAZIL

In Brazil, the prairie domain begins South of the 30th parallel. This domain includes a large portion of the crystalline massif of Rio Grande do Sul and is very heterogeneous with respect to climate and geology. The climate here is subtropical with transition to temperate and characterized by a rainfall of 1,500 mm, uniformly distributed throughout the year. The soils of this region are relatively humiferous and present similarities to Uruguayan and Argentinian brunizems. Detailed study of the mineralogy, the humus and the absorption complex state of some typical profiles characterizes these as desaturated ferralitic soils from the acidification and the strong aluminization of superficial horizons. Clay formation is rather important. In the granitic regions kaolinite is almost the only clay mineral to be found, while in the gneissic parent rocks kaolinite appears associated with vermiculite and smectite. In this case, because smectite is instable, only kaolinite and vermiculite remain in the soil. The humus is

little polymerized and relatively mobile. The acidity is generally strong. The free aluminium is found in excludable form and complexed by the humus. In this case, aluminization occurs in the interlayer spaces of the 2/1 clay minerals.

INTRODUCTION

Au Brésil, dans la zone de climat humide qui s'étend, vers le sud, du Tropique du Capricorne à la frontière de l'Uruguay, lorsqu'il y a conjonction des précipitations élevées avec un régime thermique relativement frais, soit à cause de l'altitude, soit à cause de la latitude, apparaissent des sols particuliers dont beaucoup, parce qu'ils sont mal connus, posent de sérieux problèmes aux classificateurs.

Le plus souvent on a affaire à des sols ferrallitiques forestiers qui, dans ces conditions, deviennent humifères; ces sols sont beiges, ou même rouges. Aux altitudes les plus élevées ou aux latitudes les plus septentrionales, la prairie remplace la forêt, les sols restent humifères mais prennent alors une teinte brune.

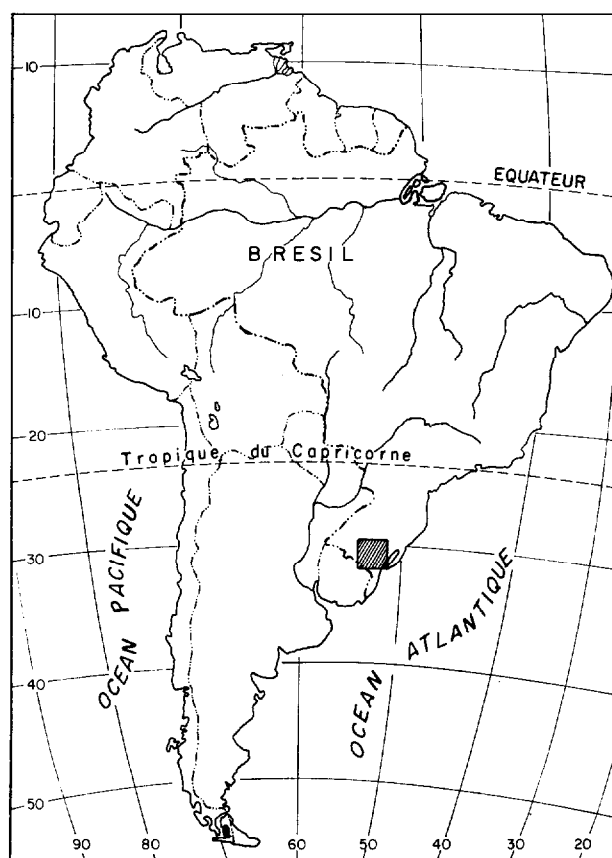


FIG. 1. — Localisation de la région étudiée.

parfois brun-jaunâtre. C'est le cas par exemple de sols de « Campos de Jordao » (Brésil, 1960) situés dans les zones à 2.000 m d'altitude de la Serra da Mantiqueira sous le Tropique, des « latosols bruns » du plateau basaltique des États de Santa Catarina et du Rio Grande do Sul (Brésil, 1971; Brésil, 1973) et des sols de la Serra do Sudeste à la frontière de l'Uruguay (Brésil, 1973) (fig. 1).

Ces derniers sont des sols de prairie formés sur roches cristallines et sous climat humide de transition, entre sub-tropical et tempéré. On sait très peu de choses à leur sujet. C'est pourquoi il nous a paru important d'introduire la discussion de leur genèse en faisant état des résultats que nous avons pu obtenir en étudiant quelques-uns d'entre eux. Ces sols méritent une attention spéciale parce qu'ils apparaissent, pour le moins géographiquement, comme intermédiaires entre les sols tropicaux et subtropicaux du Paraná et Santa Catarina, et des sols qui appartiennent aux zones de transition pour le climat tempéré, les brunizems de l'Uruguay.

Le Brésil au sud du Tropique du Capricorne est un vaste plateau doucement incliné vers l'ouest. Son altitude est de 1.000 m au niveau du littoral atlantique, elle n'est plus que de 100-200 m aux frontières avec l'Argentine et le Paraguay. Il s'agit en fait d'un ensemble complexe constitué de divers plateaux emboîtés, délimités par les formations géologiques du Bassin sédimentaires du Paraná.

Le socle cristallin n'apparaît que sur les bordures orientales du plateau dans les États du Paraná (région de Curitiba) et du Rio Grande do Sul (sud-ouest de Porto Alegre) (fig. 2). Dans la première de ces régions, les reliefs sont élevés, dans la seconde les altitudes deviennent beaucoup plus modestes.

Les roches sédimentaires, dont les plus anciennes sont d'âge dévonien et les plus récentes néo-tertiaires, occupent l'essentiel de l'intérieur des terres. Entre le plateau grés-basaltique interne et le plateau atlantique cristallin, on trouve une dépression périphérique s'étendant en forme d'arc aux pieds d'une cuesta basaltique; elle correspond aux roches paléozoïques (dévonien et permo-carbonifère).

Les sols, objets de cette étude, sont les sols du socle cristallin du Rio Grande do Sul. Ce socle, formé par le complexe de roches plutoniques, métamorphiques et sédimentaires éo-paléozoïques et antécambriennes, est situé au sud-ouest de Porto Alegre. Il correspond à

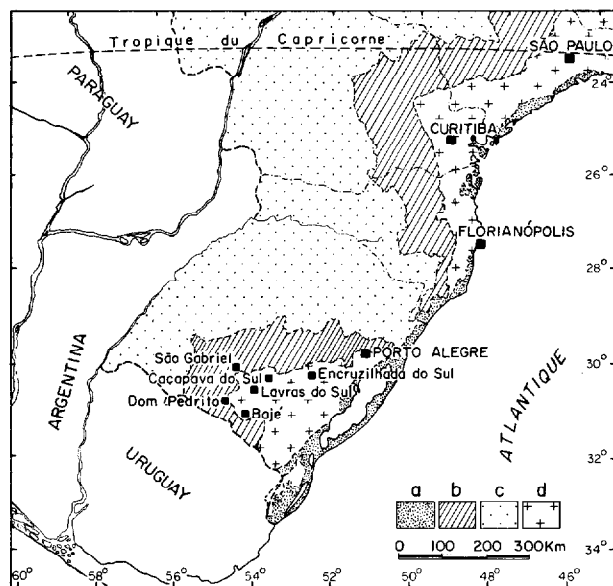


FIG. 2. — Grands traits géomorphologiques et géologiques du Brésil du sud; (a) plaines côtières, dépôts quaternaires; (b) dépression périphérique, formations paléozoïques; (c) plateaux internes grés-basaltiques; (d) plateau atlantique et Serra du Sudeste, socle cristallin.

une des quatre unités géomorphologiques majeures de l'Etat (fig. 2). Il représente une dorsale de relief normalement ondulé et correspond à ce que localement on appelle la « Serra du Sudeste ».

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. L'environnement

1.1.1. LE MODELÉ

La Serra du Sudeste a une altitude de 400-500 m dans ses zones les plus hautes, qui sont situées au nord et à l'est. Le modelé général est légèrement ondulé. Les rivières principales ont cependant profondément entaillé le massif en creusant des vallées étroites à versants abrupts, ce qui donne en définitive une topographie assez accidentée. Le rebord du massif vers la dépression centrale est très net. Lorsqu'on va vers le sud-ouest l'altitude générale décroît, les ondulations s'atténuent et les vallées deviennent moins profondes; on passe à la zone des « *coxilhas* », collines très aplaties, caractéristiques du paysage à modelé très doux des régions frontalières de l'Uruguay. Dans les parties les plus hautes du nord et de l'est, les affleurements rocheux sont nombreux, les sommets et versants étant parsemés de boules granitiques de toutes tailles. Vers

le sud, le substrat rocheux est beaucoup plus rarement visible.

1.1.2. GÉOLOGIE

Les gneiss migmatitiques, appartenant au sous-groupe Cambai, dominent largement la lithologie de la région (Brésil, 1974). Au sein des gneiss migmatitiques affleurent des amphibolites, des gneiss à biotite, des gneiss à muscovite, des gneiss granitisés et peuvent apparaître de petites lentilles de calcaires et dolomies. Les roches granitiques sont aussi bien représentées. Elles se rencontrent en batholites de tailles variées, disséminés dans l'ensemble du complexe cristallin, les plus importants étant localisés dans le nord-est, région de Encruzilhada do Sul. Ces granites, tous assez semblables, sont constitués de quartz, microcline et plagioclase (albite et andésine) associés à de petites quantités de biotite et plus rarement de hornblende, zircon, apatite et titanite. Ce sont des granites post-tectoniques de texture porphyroïde et dans certains cas rapakivique.

1.1.3. CLIMAT

Le climat de la région est caractérisé par des pluviométries élevées, régulièrement réparties au cours de l'année, et des températures moyennes inférieures à 20 °C. Il s'agit d'un climat relativement humide et frais du type subtropical.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 1.500-1.600 mm au nord du massif. Les villes situées sensiblement à la même latitude ont les moyennes suivantes : Encruzilhada do Sul : 1.535 mm; Caçapava do Sul : 1.632 mm; São Gabriel : 1.619 mm (NIMER, 1977). La pluviométrie est un peu plus faible au Sud du Massif : Bajé : 1.371 mm; Dom Pedrito : 1.338 mm (NIMER, 1977). Les pluies tombent toute l'année; il n'y a pas de saison sèche; on note simplement une légère diminution du volume des précipitations durant les mois d'été (novembre, décembre) (fig. 3).

Les températures moyennes annuelles sont de 16-18 °C. Il y a un contraste net entre les saisons. Ceci s'explique par la situation de la région dans la zone des latitudes moyennes (30-32° de latitude sud) où la position du soleil règle la succession des saisons été-automne-hiver-printemps. Sur les hauteurs de la Serra, les températures moyennes du mois d'été le plus chaud (janvier) sont de 20-22 °C; elles sont à peine plus élevées dans les vallées (22-24 °C). Ces moyennes n'excluent pas des températures journalières élevées qui peuvent atteindre 40 °C. L'hiver, qui correspond à la période de jours courts (mai à août), est dans l'ensemble frais, les mois les plus froids étant juin et surtout juillet avec des tempé-

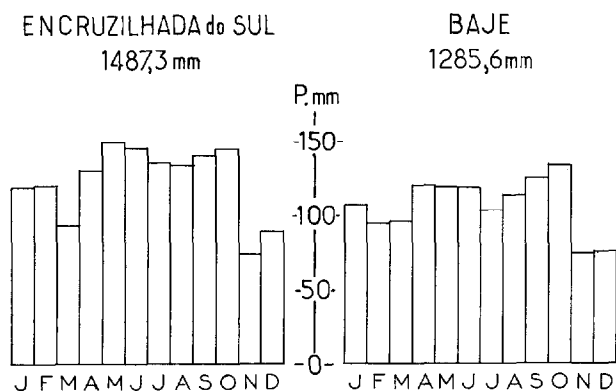


FIG. 3. — Distribution mensuelle de la pluviométrie à Encruzilhada do Sul et à Bajé (Brésil, 1973).

ratures moyennes inférieures à 13 °C (10 à 13 °C). Durant cette période les températures journalières ne dépassent pas 20 °C et les gelées matinales sont très fréquentes; les chutes de neige sont, par contre, exceptionnelles.

Dans le système de classification de KÖPPEN (Brésil, 1973), le climat apparaît comme intermédiaire entre le climat Cfa, subtropical a été chaud sans saison sèche (les températures moyennes annuelles sont inférieures à 18 °C et la température moyenne du mois le plus chaud est supérieure à 22 °C), et le climat Cfb, océanique tempéré humide (températures moyennes annuelles inférieures à 18 °C et températures moyennes du mois le plus chaud inférieures à 22 °C). Avec le système de PÉGUY (1970) on se trouve également entre deux climats, un subtropical (8 moyennes mensuelles supérieures à 10 °C et moyenne du mois le plus chaud supérieure à 22 °C) et un climat tempéré océanique chaud (8 moyennes mensuelles supérieures à 10 °C et moyenne mensuelle du mois le plus chaud inférieure à 22 °C).

Il s'agit donc d'un climat subtropical avec des caractères de transition vers le climat tempéré.

1.1.4. VÉGÉTATION

La formation végétale de cette région est le Campo. Il s'agit d'une prairie qui est du domaine de la *pampa* argentino-uruguayenne, dont c'est ici la limite nord. La formation est rase, essentiellement graminéenne (*Andropogon* sp., *Aristida* sp., *Briza* sp., *Euranthus* sp., *Paspalum* sp., *Poa* sp., *Stipa* sp.), comportant aussi des légumineuses telles que le *Trifolium rio-grandense* et quelques espèces caractéristiques comme *Baccharis* (carquejo), *Eryngium* sp. (caraguatá). Quelques arbres se rassemblent dans les creux, formant des forêts galeries qui accompagnent les cours d'eau.

En fait, la prairie n'est vraiment typique que dans la partie la plus méridionale du massif, dans la zone des coxilhas. Lorsqu'on va vers le Nord apparaissent en effet des bouquets arbustifs de plus en plus abondants. Dans les parties les plus hautes ces bouquets arrivent ainsi à occuper jusqu'à 50 % de la surface du sol. Dans ces zones le paysage n'a plus rien d'un campo, c'est plutôt une forêt arbustive sub-tropicale (Brésil, 1973). Les espèces arbustives dominantes sont *Myrsine umbellata* (caapororoca), *Nectandra* sp. (canela). Malgré l'aspect boisé, l'élément dominant de l'association est néanmoins presque toujours la prairie.

1.1.5. UTILISATION DES SOLS

L'ensemble du massif est bien adapté à l'élevage (principalement des bovins mais aussi des ovins). L'agriculture est peu importante et paraît surtout localisée dans le nord-est granitique où le blé, le maïs et le haricot sont les principales cultures.

1.2. Les sols

Les sols du massif cristallin du Rio Grande do Sul choisis pour cette étude peuvent, schématiquement, être regroupés autour de trois types principaux. Deux se trouvent dans la zone granitique, le troisième est associé aux gneiss et migmatites. Nous donnerons un exemple de profil de chaque type. Auparavant nous présenterons rapidement les méthodes d'analyses utilisées au laboratoire.

1.2.1. MÉTHODES ANALYTIQUES

Les analyses suivantes ont été exécutées sur la fraction terre fine (fraction inférieure à 2 mm) :

- analyse granulométrique : méthode pipette Robinson après dispersion au pyrophosphate de soude et destruction de la matière organique par l'eau oxygénée;
- carbone total : dosage par oxydation à chaud au bichromate de potassium en milieu sulfurique;
- humus : fractionnement par la méthode de DABIN (1971); le carbone de chaque fraction est ensuite déterminé par oxydation au bichromate de potassium en milieu sulfurique;
- bases échangeables : extraction à l'acétate d'ammonium normal à pH 7; dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique (magnésium) ou d'émission (calcium, sodium, potassium);
- aluminium échangeable : extractions successives par KCl N (temps de contact 15 minutes, rapport sol/solution 2/5); dosage par absorption atomique; détermination de l'aluminium échangeable par voie graphique;

- capacité d'échange : méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7;
- fer total : attaque à chaud par un mélange d'acides chlorhydrique et perchlorique concentrés; dosage par absorption atomique;
- fer libre : méthode de Endredy (SEGALEN, 1970), temps d'exposition 1 h 30'; dosage par absorption atomique;
- fer et aluminium amorphes : méthode SEGALEN (1968); dosage par absorption atomique.

Les études minéralogiques ont essentiellement porté sur les fractions argiles. Celles-ci ont été séparées et préparées suivant la méthode décrite par ROBERT et TESSIER (1974).

1.2.2. PROFILS TYPES

Type I - Profil GRS 3

Il s'agit du sol commun sur granites dans les parties élevées du nord et du centre de la Serra du Sudeste. On le trouve dans un paysage à modelé ondulé où les affleurements et boules granitiques sont très abondants. La végétation est une association forêt arbustive subtropicale-prairie.

Le profil GRS 3 est localisé à 25 km à l'est de Encruzilhada do Sul. Il a été observé sous prairie à mi-pente d'un versant convexe. La pente est de 2-3 ‰. La succession d'horizons est la suivante (voir aussi fig. 4 et tabl. I) :

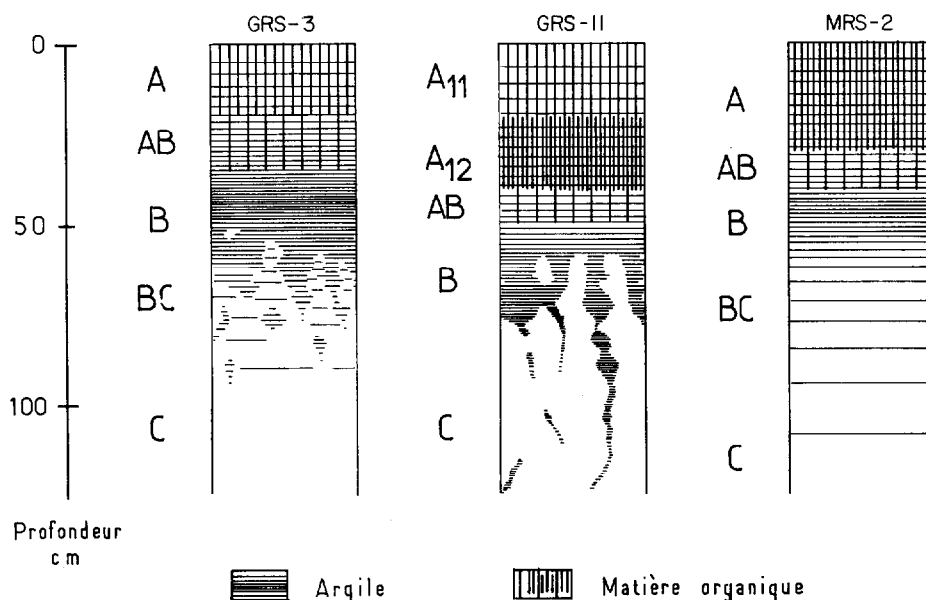


FIG. 4. — Représentation schématique des 3 types de sols étudiés.

0-15 cm - Horizon A, brun (5 YR 4/4 humide); argilo-sableux devenant progressivement argileux; la structure est généralement bien développée, grumeleuse à polyédrique subanguleuse fine. L'horizon est meuble mais sa macroporosité est faible. La transition est graduelle.

15-30 cm - Horizon AB, brun, (5 YR 3/4 humide); argileux; à structure peu nette, polyédrique sub-anguleuse moyenne. Macroporosité faible. La transition est diffuse.

30-50 cm - Horizon B, brun rouge (2,5 YR 4/4 humide); argileux; à structure peu nette, polyédrique moyenne. La macroporosité est toujours faible mais les agrégats sont assez poreux. L'horizon est friable. La transition est diffuse.

50-90 cm - Horizon BC constitué d'un mélange de terre argi-

leuse brun-rouge, devenant moins abondante, plus claire et peu structurée en profondeur, et d'éléments de roche altérée de toutes dimensions, de formes irrégulières, intimement mêlés à la terre fine. Ces éléments de roche sont friables, de couleur brun rougeâtre hétérogène. La transition est diffuse.

80-200 cm et + Horizon C. Arène granitique avec quelques poches argileuses. Le matériau devient assez cohérent à partir de 150 cm. Les minéraux primaires sont bien visibles et durs.

L'enracinement (constitué de racines de graminées principalement) est surtout important dans le premier horizon. Il y a cependant encore des racines dans l'horizon B.

TABLEAU I
Caractéristiques analytiques du profil GRS 3 (type I)

Horizon		A	AB	B	BC	C	
Profondeur (cm)		0-10	15-25	35-45	60-70	90-100	125-135 170-180
n° échantillon		31	32	33	34	35	36 37
Fraction > 2 mm	%	35	63	36	37	34	34 83
Argile	%	34	49	51	33	31	24 27
Limon fin	%	8	8	8	10	13	11 15
Limon grossier	%	3	2	4	4	3	3 4
Sable fin	%	10	6	11	8	11	11 14
Sable grossier	%	37	26	19	40	36	47 35
Humidité (H ₂ O)	%	4	5	5	4	5	4 5
Matière organique	%	4	4	2	1	1	— —
pH _{H₂O}		5,1	5,0	5,0	4,9	4,8	4,8 4,8
pH _{KCl}		3,8	3,8	3,7	3,9	3,9	3,9 3,9
Carbone total	C 0/00	21,8	23,0	13,4	5,5	3,1	2,2 1,7
Azote total	N 0/00	1,1	1,1	0,8	0,3	0,3	0,2 0,2
C/N		21	21	18	17	12	13 10
Ca ⁺⁺⁺	mé/100 g	1,0	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3 —
Mg ⁺⁺	mé/100 g	0,2	0,1	0,1	—	—	— —
K ⁺	mé/100 g	0,4	0,4	0,1	—	—	— —
Na ⁺	mé/100 g	—	—	—	—	—	— —
S	mé/100 g	1,6	1,1	0,7	0,4	0,4	0,3 0,3
T	mé/100 g	6,7	10,9	10,2	3,8	6,0	3,4 3,4
Al ⁺⁺⁺	mé/100 g	1,9	3,6	4,0	3,2	3,2	3,2 3,2
100 S/T		24	10	7	11	7	9 9
Fer total	Fe ₂ O ₃ %	4,4	5,8	6,4	6,3	5,6	5,6 5,6
Fer libre	Fe ₂ O ₃ %	3,7	4,7	4,8	4,5	4,4	4,3 4,3
Fer libre							
100. —		84	81	75	75	78	77 77
Fer total							

Ce sol est développé dans un matériau assez fortement graveleux. Ces graviers sont des quartz anguleux de 2 à 10 mm dans les horizons A et B, quartz et grains de feldspath peu friables auxquels s'associent des éléments de roche incomplètement désagrégés à la base de B et surtout dans BC et C.

Type II - Profil GRS 11

Ce type appartient également à la zone granitique. Il est fréquent au sud de la Serra, plus rare au nord. On le trouve dans un paysage ondulé où les affleurements et boules granitiques sont en nombre beaucoup moindre que dans le cas précédent. La végétation est une association forêt arbustive subtropicale-prairie où la prairie est très largement dominante. Le profil GRS 11 est localisée à 80 km à l'est de Bajé à proximité du village de Pedras Altas. La végétation est une prairie. Le profil est situé près du sommet d'une petite élévation; la pente est de 2-3 %. La succession des horizons est la suivante (fig. 4, tabl. II) :

0-25 cm - Horizon A₁₁, gris foncé (7,5 YR 4/2, humide); humifère, sableux à sablo-argileux; particulière à tendance grumeleuse. La transition est graduelle.

25-40 cm - Horizon A₁₂, noir (5 YR 2,4/2, humide), humifère; sablo-argileux à argilo-sableux; structure peu nette polyédrique moyenne; friable, assez poreux. La transition est graduelle.

40-55 cm - Horizon AB, brun foncé, (5 YR 3/2, humide); humifère, argilo-sableux; structure polyédrique moyenne peu nette, friable, assez poreux. Transition graduelle.

55-80 cm - Horizon B, brun (7,5 YR 4/4 humide); argilo-sableux à argileux; structure polyédrique moyenne peu nette, faible macroporosité mais les agrégats sont assez poreux; friable. Transition diffuse.

85-120 cm - Horizon BC, gris-brun clair, (10 YR 5/6, humide); argilo-sableux à argileux; structure polyédrique peu nette, assez poreux et friable comme l'horizon précédent. On rencontre dans cet horizon des blocs de 5 à 10 cm de forme allongée, disposés verticalement, constitués de roche altérée friable et présentant sur les faces latérales et

TABLEAU II
Caractéristiques analytiques du profil GRS 11 (type II)

Horizon		A ₁₁			A ₁₂	AB	B		BC
Profondeur (cm)		0-5	5-15	15-25	30-40	40-50	60-70	75-85	100-110
n° échantillon		111	112	113	114	115	116	117	118
Fraction > 2 mm	‰	10	39	41	59	60	45	32	30
Argile	‰	17	17	17	34	30	39	47	39
Limon fin	‰	12	12	11	8	11	13	12	12
Limon grossier	‰	9	9	7	6	9	10	9	9
Sable fin	‰	17	16	13	8	9	9	8	8
Sable grossier	‰	37	39	48	34	33	24	18	28
Humidité (H ₂ O)	‰	3	3	2	5	4	4	5	4
Matière organique	‰	5	4	3	5	4	1	1	—
pH _{H₂O}		4,9	4,7	4,6	4,7	4,6	4,7	4,6	4,6
pH _{KCl}		4,2	3,9	3,9	3,8	3,9	3,9	3,8	3,9
Carbone total	C ‰	29,1	20,8	17,6	31,8	20,2	7,2	4,8	2,5
Azote total	N ‰	2,2	1,6	1,1	1,7	1,3	0,7	—	—
C/N		13	13	15	18	16	10		
Ca ⁺⁺	mg/100 g	2,3	1,1	0,8	1,3	1,1	0,9	0,9	
Mg ⁺⁺	mg/100 g	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
K ⁺	mg/100 g	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	
Na ⁺	mg/100 g	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	—	—	
S	mg/100 g	3,4	1,9	2,0	1,6	1,3	1,3	1,3	
T	mg/100 g	12,9	12,2	9,3	16,4	10,1	8,6	10,4	
Al ⁺⁺⁺	mg/100 g	0,3	1,1	1,6	4,2	3,5	4,5	5,6	5,2
100.S/T		26	16	14	12	16	15	13	
Fer total	Fe ₂ O ₃ ‰	2,6	2,6	2,9	4,3	4,2	5,3	6,1	6,8
Fer libre	Fe ₂ O ₃ ‰	1,8	1,8	2,0	2,9	2,9	3,7	4,1	4,9
Fer libre									
100. —————		69	69	69	67	69	70	67	72
Fer total									

supérieures un cortex rouille de 1-2 cm un peu plus cohérent. Ces blocs deviennent jointifs à la base de l'horizon. La transition est diffuse.

120-220 cm et + Horizon C. Arène granitique de couleur claire, d'abord très friable puis plus cohérente. Quelques poches verticales de matériau argileux gris.

L'enracinement est surtout important dans le premier horizon (A₁₁). Il y a cependant des racines jusque dans l'horizon B. Le sol se développe, là encore, dans un matériau assez fortement graveleux, à graviers de quartz (de 2-20 mm de diamètre) principalement.

Type III - Profil MRS 2

Il s'agit d'un type représentatif des sols de la zone méridionale de la Serra à substrat de gneiss et migmatites et modelé très doux. Les affleurements

rocheux sont rares et la végétation est une prairie typique. Le profil MRS 2 est localisé sur la route Sao Gabriel-Lavras do Sul, à 22 km de São Gabriel. Il se trouve à mi-pente d'un versant convexe; la pente est de 5-8 %. Le profil est le suivant (fig. 4; tabl. III) :

0-25 cm - Horizon A, brun foncé (10 YR 2,5/1, humide); humifère; argilo-sableux, à structure nette, grumeleuse à polyédrique subanguleuse. L'horizon est poreux et friable. La transition est graduelle.

25-35 cm - Horizon AB, brun foncé, (7,5 YR 3/2, humide); humifère, argilo-sableux; structure polyédrique moyenne nette; poreux et friable. La transition est graduelle.

35-55 cm - Horizon B, brun très légèrement rouge (5 YR 4/6, humide); argileux; structure polyédrique grossière nette; agrégats à pores assez nombreux. Quelques faces brillantes mais pas de revêtements visibles. Nombreux

minéraux primaires visibles. La transition est graduelle.

55-90 cm - Horizon BC, brun plus clair, (7,5 YR 5/2, humide); limono-argileux; structure polyédrique grossière de moins en moins nette, agrégats poreux et friables. Très nombreux minéraux primaires visibles. La transition est diffuse.

90-150 cm et + Horizon C : Matériau friable, beige, provenant de l'altération de gneiss.

L'enracinement est important dans les deux premiers horizons (A et B), les racines sont beaucoup plus rares ensuite mais restent visibles dans BC.

TABLEAU III

Caractéristiques analytiques du profil MRS 2 (type III)

Horizon		A	AB	B	BC	C		
Profondeur (cm)		0-5	15-25	25-35	40-50	65-75	120-130	
n° échantillon		21	22	23	24	25	26	27
Fraction > 2 mm	‰	1	1	3	5	3	7	12
Argile	‰	23	25	25	26	33	17	8
Limon fin	‰	10	9	10	12	14	16	5
Limon grossier	‰	8	8	8	8	6	7	4
Sable fin	‰	19	18	16	18	12	22	28
Sable grossier	‰	29	30	33	29	28	34	52
Humidité (H ₂ O)	‰	4	4	4	4	5	4	3
Matière organique	‰	7	6	4	3	2	—	—
pH _{H₂O}		5,5	5,5	5,6	5,6	6,0	6,7	6,6
pH _{KCl}		4,5	4,1	4,1	4,0	3,8	3,5	3,8
Carbone total	C ‰	38,5	33,3	25,7	19,0	9,4	2,1	0,4
Azote total	N ‰	1,9	1,9	1,4	1,0	0,6	0,3	0,1
C/N		20	17	18	19	17	6	8
Ca ⁺⁺⁺	mg/100 g	6,2	6,5	6,1	6,0	5,9	7,7	8,0
Mg ⁺⁺	mg/100 g	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5	0,8	0,8
K ⁺	mg/100 g	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	—
Na ⁺	mg/100 g	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3
S	mg/100 g	7,6	7,6	7,0	6,7	6,8	9,0	9,1
T	mg/100 g	14,7	13,4	13,0	14,0	15,0	10,6	6,9
Al ⁺⁺⁺	mg/100 g	0,2	0,6	0,7	1,0	2,4	1,8	0,3
100.S/T		52	57	54	48	45	85	sat.
Fer total	Fe ₂ O ₃ ‰	4,4	4,7	4,9	5,4	7,1	6,9	7,0
Fer libre	Fe ₂ O ₃ ‰	3,3	3,6	3,7	4,1	5,3	4,7	3,6
100. Fer libre		74	77	77	76	75	69	51
100. Fer total								

En ce qui concerne la morphologie il y a donc, entre ces trois sols, un certain nombre de traits communs mais aussi d'importantes différences.

Les trois sols ont en commun une épaisseur de profil (horizons A + B) relativement faible (60-80 cm), des horizons humifères bien développés et des horizons B de couleur dominante brune.

Les différences portent principalement sur les niveaux d'altération et les horizons A.

Les niveaux d'altération des sols des types I et III sont uniformément colorés. Macroscopiquement, ils apparaissent comme constitués d'un intime mélange de roche incomplètement altérée et de matériau argilié. On assiste donc à l'altération progressive de la roche dans sa masse. Dans les niveaux d'altération des sols du Type II on observe, au contraire, un fort contraste entre la roche arénisée, où la plupart des minéraux restent visibles, et une masse argilifiée sans minéraux primaires; le matériau argileux paraît dans

ce cas se développer dans les fissures et diaclases de la roche et forme des langues qui envahissent progressivement la roche en voie d'altération.

Les horizons A des sols des types I et III ont à peu près la même épaisseur mais ils diffèrent par leur structure. La structure des sols du type III est, en effet, beaucoup plus affirmée que celle du type I. Les horizons A des sols du type II se distinguent par leur épaisseur plus grande; on y observe par ailleurs deux sous-horizons, l'un gris superficiel (A_{11}) et un second noir plus profond (A_{12}).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Composition granulométrique

Type I

Le sol est très graveleux. Les graviers sont constitués de quartz mais aussi de feldspaths que l'on trouve en proportions non négligeables à la base du profil. Ces graviers représentent 30 % en poids du matériau de l'horizon B et 50-60 % du matériau de A. La partie du profil la plus graveleuse est généralement située à la base de l'horizon A (fig. 5 : GRS 3).

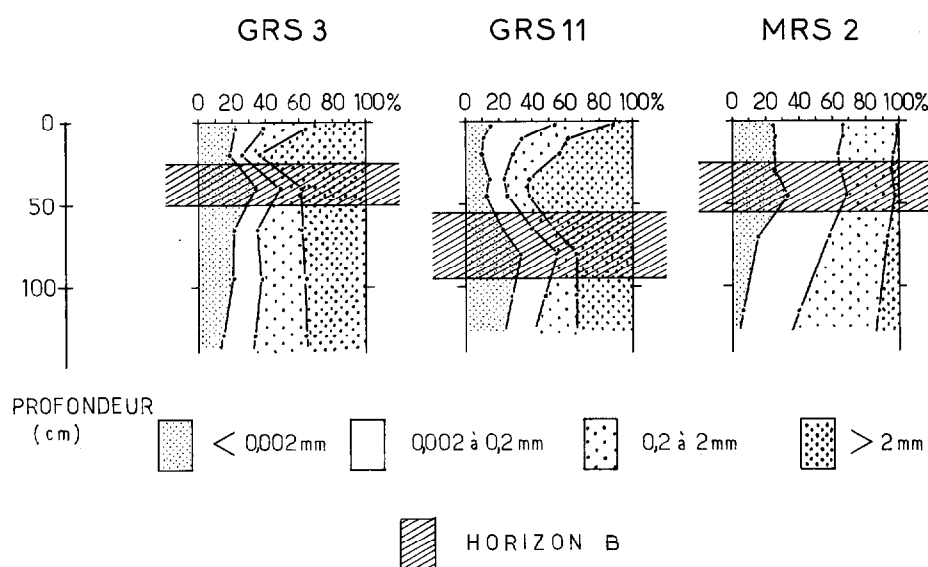


FIG. 5. — Granulométrie des sols.

La terre fine (fraction inférieure à 2 mm) est argilo-sableuse en surface, nettement argileuse en B (50-60 % d'argile); en C les proportions d'argile diminuent progressivement. Il y a 5 à 10 % de limons fins et 3-5 % de limons grossiers, les taux les plus élevés correspondant aux horizons C. Dans tout le profil les sables grossiers sont plus abondants que les sables fins (rapport sables grossiers/sables fins compris entre 3 et 5).

On a donc affaire à des sols pauvres en limons et riches en éléments grossiers (graviers et sables grossiers).

Les variations verticales montrent qu'il y a une augmentation des taux d'argile lorsqu'on passe de C à B. Ceci est le résultat de l'argilification progressive des matériaux d'altération. Il y a d'autre part une nette diminution des taux d'argile dans les horizons supé-

rieurs. Cet appauvrissement est probablement dû au lessivage mais il peut s'agir aussi d'un caractère hérité, lié aux conditions de mise en place des matériaux; des remaniements semblent en effet avoir affecté les couches les plus superficielles du sol.

Type II

Ce type est également graveleux. Les éléments grossiers sont constitués de quartz surtout. Comme dans les sols du type précédent leur nombre augmente dans les horizons A (fig. 5 : GRS 11). La composition granulométrique varie d'un sol à l'autre : le taux d'argile de la terre fine des horizons B est parfois de 25 %, parfois de 50 %. Il s'agit, en fait, de variations apparentes car, si l'on considère le sol total et non plus la fraction inférieure à 2 mm seule, les taux d'argile deviennent beaucoup moins variables et restent compris entre 25 et 35 %. Ceci s'explique facilement. On

constate en effet que la somme des éléments grossiers et des sables grossiers est toujours du même ordre de grandeur mais que le rapport éléments grossiers/sables grossiers est très variable. De faibles modifications de la texture de la roche, entraînent donc des différences importantes dans la texture de la terre fine du sol. Ces différences résultent de la coupure granulométrique arbitraire faite à 2 mm.

Les taux de limons fins et de limons grossiers sont respectivement de 10-15 % et 5-10 % de la terre fine.

Les variations verticales dans chaque profil montrent qu'il y a un maximum d'argile en B par suite de l'argilification progressive du matériau lorsqu'on passe de C à B et de l'appauvrissement en argile des horizons A. L'existence d'un gradient textural de A vers B plus accusé que dans le cas précédent serait l'indication d'un lessivage vertical plus intense. Le lessivage ne paraît cependant pas être, là encore, seul en cause, car il y a des indices très nets de remaniement (concentration des éléments grossiers à la base du A par exemple).

Type III

Dans ce type de sol dérivé de gneiss, les éléments grossiers sont très peu abondants. Les taux d'argile sont de 20-30 % dans l'horizon A, ils varient de 30 à 60 % dans l'horizon B. La transition de A vers B est toujours très graduelle. Les taux de limons fins sont de l'ordre de 10 % dans A et dans B, ils passent à 15 % dans l'horizon BC. Il y a de 5 à 10 % de limons grossiers. Le rapport sables grossiers/sables fins est compris entre 1 et 3.

Il s'agit donc d'un type de sol non graveleux, sans différenciation texturale marquée.

2.2. Minéralogie de la fraction argileuse

La fraction $< 2 \mu$ des sols du type I est surtout constituée de kaolinite; on trouve aussi de petites quantités de minéraux 2/1 (fig. 6 : GRS 3).

La kaolinite est identifiée par ses pics de diffraction à 7,2 et 3,57 Å qui sont toujours très nets et aigus.

Les minéraux 2/1 donnent des équidistances de 10 et 12 Å. Le pic à 10 Å apparaît aussi bien sur les argiles-K que sur les argiles-Mg. Il est aigu avec les premières, fortement élargi vers les petits angles avec les secondes. Il s'agit donc d'illites altérées. Le minéral à 12 Å ne présente aucune expansion à l'éthylène glycol et nécessite un chauffage à 350° pour se refermer à 10 Å : on a donc affaire à un interstratifié illite-vermiculite où certains espaces interfoliaires sont aluminés.

On note peu de variations dans le profil. Il semble

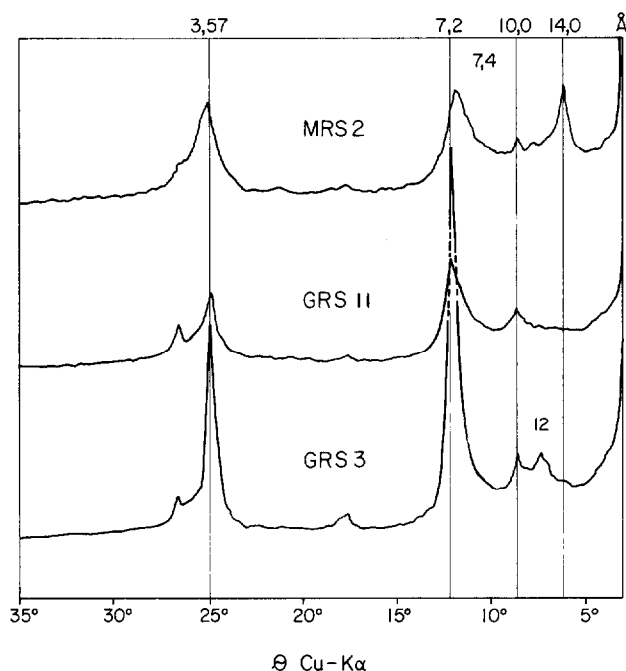


FIG. 6. — Diffractogrammes de rayons X de l'argile-K déferriée de l'horizon B de 3 profils (argile orientée).

toutefois, dans la mesure où il est possible d'évaluer les proportions relatives des minéraux présents par le rapport de l'intensité de leurs pics de diffraction, que les quantités d'interstratifiés soient plus grandes dans les sols que dans les arènes.

La fraction argileuse paraît donc surtout kaolinique. Dans l'arène la kaolinite est associée à de faibles quantités d'illites. La formation d'interstratifiés illite-vermiculite-Al serait facilitée dans le sol.

Les profils du type II présentent une fraction argileuse encore presque exclusivement kaolinique. Il y a également de petites quantités d'illite (fig. 6 : GRS 11) mais aucun autre minéral 2/1 ne peut être décelé.

Les argiles des sols du type III forment un mélange plus complexe. Dans tous les horizons du sol il y a de la kaolinite et différents minéraux 2/1.

Le minéral kaolinitique est une métahalloysite : son équidistance principale est de 7,4 et passe à 7,2 après chauffage, les pics principaux sont d'autre part peu intenses et fortement dissymétriques (fig. 6 : MRS 2). Cette métahalloysite se maintient sans modifications apparentes dans tout le profil.

En ce qui concerne les minéraux 2/1, on constate que dans la roche altérée et dans l'horizon BC il y a un mélange où dominent smectites et vermiculites (fig. 7 : BC). Les diffractogrammes indiquent en effet la pré-

sence d'illite en très petite quantité (pic à 10 Å) et surtout de minéraux à 14 Å. Une partie importante de ceux-ci est expansible à l'éthylène-glycol (l'argile Mg passe de 15 à 17 Å). La saturation au potassium renforce la réflexion à 10 Å et fait apparaître une large bande entre 10 et 14 Å. Le chauffage à 110 °C rabat l'ensemble à 10 Å. Il s'agit donc d'un mélange de smectites et de vermiculites.

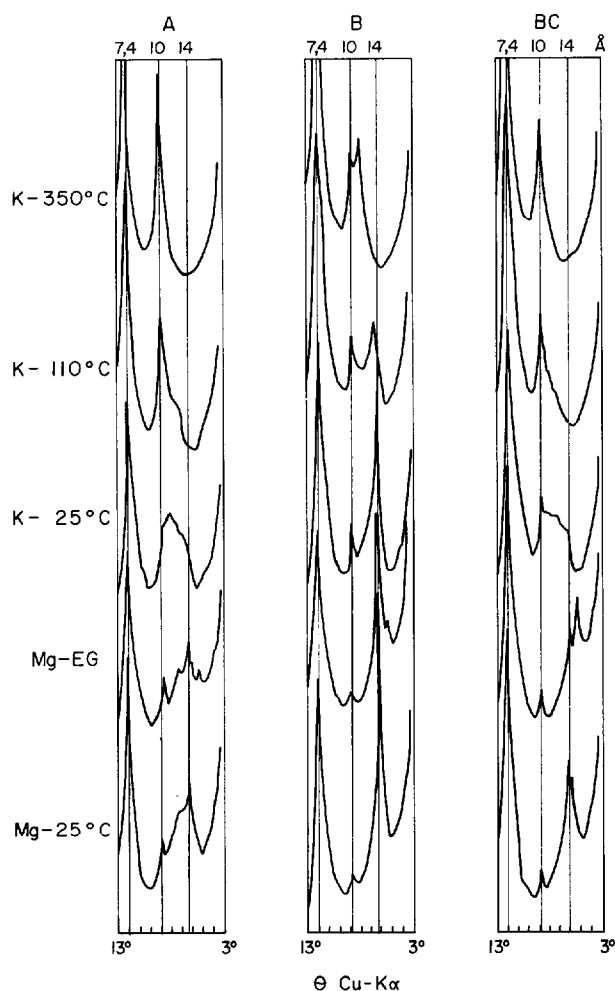


FIG. 7. — Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse (< 2 microns) des horizons A, B et BC du profil MRS 2 (lames orientées, argile non déferriée).

Dans l'horizon B, la proportion de matériel expansible à l'éthylène glycol devient très faible et la saturation au potassium est sans effets sur les minéraux à 14 Å. Leur fermeture à 10 Å nécessite un chauffage à 550 °C; à 350 °C, comme on peut constater, la fermeture n'est qu'incomplètement réalisée. On se trouve donc en présence d'argile chloritisée proba-

blement de vermiculite à espaces interfoliaires assez fortement aluminisés.

Dans les horizons A la proportion d'illite augmente légèrement. Il y a toujours des minéraux à 14 Å, mais apparaissent aussi des interstratifiés (pic à 12 Å). Il y a très peu de smectites et la fermeture à 10 Å de l'ensemble des minéraux à 12 et 14 Å est obtenue par chauffage à 350 °C, donc beaucoup plus facilement que dans l'horizon B. Dans l'horizon A on a donc de l'illite, très peu de smectites, surtout des vermiculites et des interstratifiés illite-vermiculite, les feuillets des vermiculites étant partiellement aluminisés.

Les smectites ne sont donc présentes que dans les horizons d'altération. Les vermiculites se maintiennent dans tout le profil. Elles sont bien individualisées et fortement aluminisées dans les horizons B. Elles sont moins abondantes, moins aluminisées dans A où elles tendent à rester associées à des illites pour former des interstratifiés semblables à ceux observés dans les sols du type I.

Les sols du type I et II se développent donc dans un matériau d'altération *essentiellement kaolinique*. Il y a peu d'illite. Les seules évolutions minéralogiques dans le profil concernent ces illites qui paraissent donner des minéraux interstratifiés illite-vermiculite-Al.

L'altération des gneiss conduit à la formation d'un *mélange de métahalloysite, smectites et vermiculites*. Les smectites disparaissent pratiquement dans le sol (soit par destruction, soit par lessivage). Les vermiculites par contre se maintiennent et semblent même se concentrer dans l'horizon B où elles sont fortement aluminisées. Dans les horizons A, ce sont les illites et surtout les interstratifiés illite-vermiculite qui tendent à devenir plus abondants. Dans les sols du type III, on assiste donc à des modifications assez marquées de la minéralogie de la fraction argileuse à l'intérieur du profil.

2.3. Matière organique

2.3.1. MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE ET RAPPORT C/N

Les diagrammes de la figure 8 indiquent le mode de distribution de la matière organique totale dans quelques profils de sols. Les profils GRS 3 et 4 correspondent à des sols du type I, les profils GRS 9 et 11 à des sols du type II et les profils MRS 2 et 4 à des sols du type III. Les résultats se rapportent à la terre fine (fraction inférieure à 2 mm).

Dans les profils du type I, les taux de matière organique sont de l'ordre de 4 %, la couche la plus superficielle du sol pouvant être beaucoup plus riche. D'une façon générale les taux ont tendance à rester

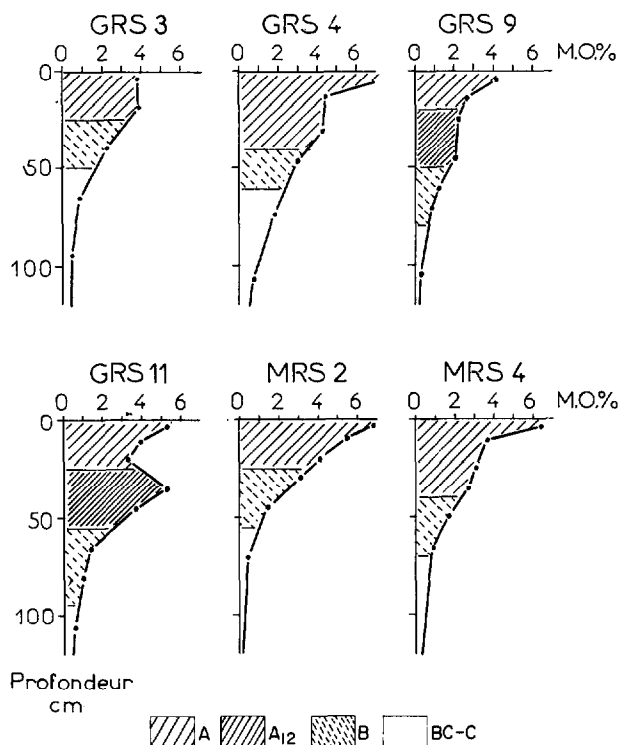


FIG. 8. — Répartition de la matière organique dans les profils (% de la terre fine).

sensiblement constants et voisins de 4 % dans les horizons A et AB. La décroissance ne commence que dans l'horizon B et, comme elle est très progressive, l'horizon B reste encore relativement humifère (2 à 3 % de matière organique totale). Les teneurs en matière organique ne deviennent négligeables qu'à la base de l'horizon BC. Le rapport C/N est élevé : 20 dans l'horizon A, 15 à 20 dans l'horizon B. Il est inférieur à 15 dans BC (fig. 9 : GRS 4).

Dans les sols du type II les taux de matière organique varient de 2 à 5 % suivant les cas. Dans le profil la répartition est assez irrégulière. Il y a un premier maximum en surface et souvent un second qui correspond à l'horizon sub-superficiel noir que nous avons appelé A₁₂. Le rapport C/N est encore élevé : 15 dans A₁₁, 15 à 20 dans A₁₂; il devient par contre plus bas dans B et BC.

Dans les profils du type III les taux de matière organique sont toujours élevés : 3 à 5 % dans A, 1 à 2 % dans B. La distribution est assez peu différente de celle des sols du type I, la décroissance avec la profondeur paraît seulement plus progressive (fig. 8 : MRS 2 et MRS 4). La relation C/N est élevée : les valeurs sont constantes dans A (C/N de 15 à 20), puis se maintiennent autour de 10 dans les horizons profonds.

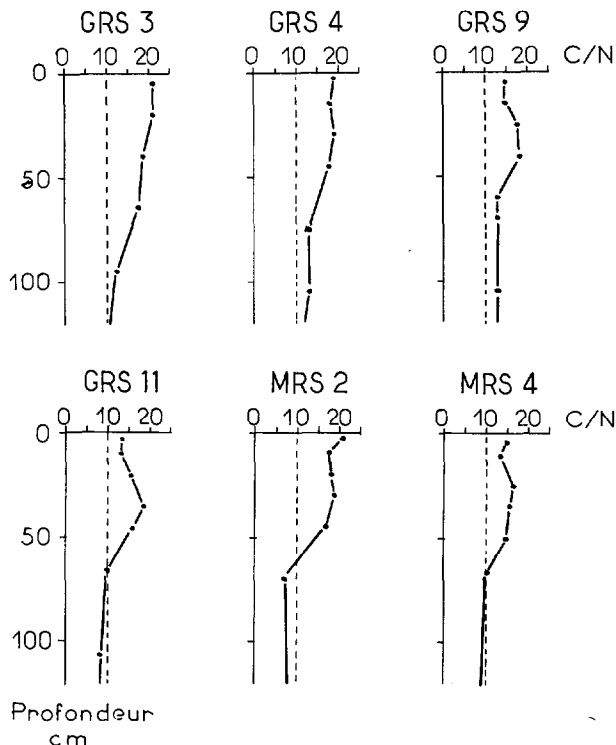


FIG. 9. — Variations du rapport C/N avec la profondeur dans quelques profils.

Il s'agit donc dans l'ensemble de sols relativement riches en matière organique et humus profondément incorporé. Dans les trois types le rapport C/N est élevé.

Une étude plus précise du type d'humus a été faite sur deux profils.

2.3.2. CARACTÉRISATION DE L'HUMUS

2.3.2.1. Sols du type II : profil GRS 11

Les résultats de l'étude par fractionnement (méthode DABIN, 1971) sont représentés dans la fig. 10.

On constate en premier lieu qu'il y a relativement peu de matières légères. Il faut toutefois rappeler qu'il s'agit de résultats concernant la terre fine. Des fragments végétaux, représentés par des racines très peu altérées ne passant pas au tamis de 2 mm, en fait existant. Leur absence dans la terre fine montre simplement qu'il n'y a pas d'états intermédiaires entre la matière végétale non ou peu décomposée et la fraction humifiée. On peut ainsi supposer que l'évolution des matières organiques fraîches est totale et rapide.

Si l'on regarde la distribution des fractions dans les profils on note que les fractions alcalino-solubles sont

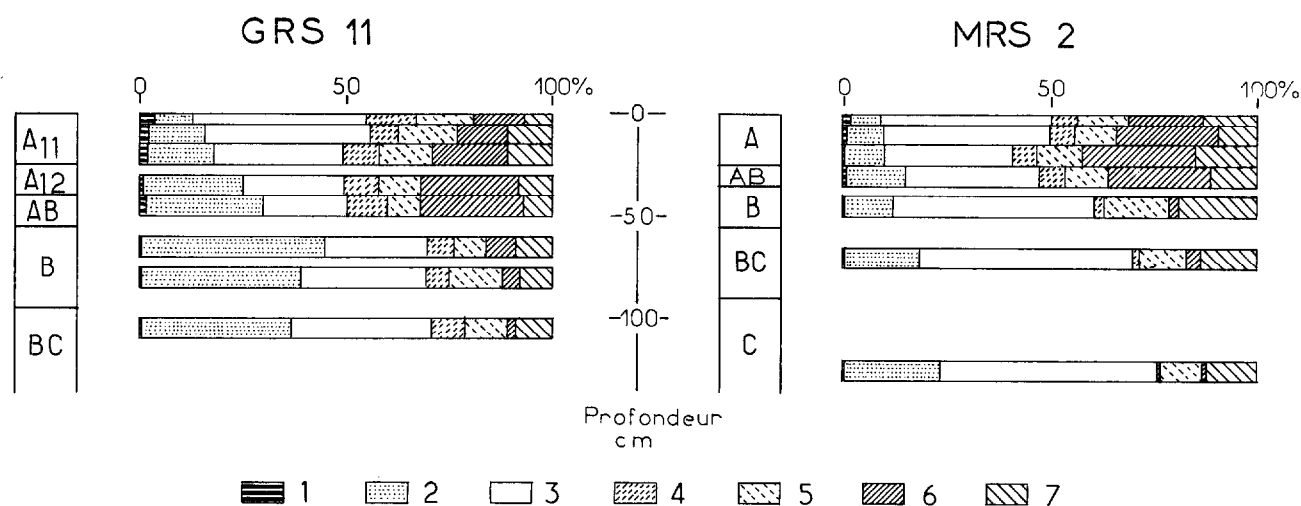


FIG. 10. — Distribution relative du carbone sur les fractions de l'humus dans deux profils : (1) matières légères; (2) acides fulviques libres; (3) humine; (4) acides humiques soude; (5) acides fulviques soude; (6) acides humiques pyrophosphate; (7) acides fulviques pyrophosphate.

les fractions les mieux représentées dans les horizons A, alors que dans les horizons B la prédominance est aux acides fulviques libres (fig. 10 : GRS 11).

Dans l'ensemble A₁₁, A₁₂ et AB, c'est-à-dire dans les 50 premiers centimètres, 50 % du carbone sont à imputer aux composés alcalino-solubles, extraits au pyrophosphate et extraits à la soude. Ces deux types d'extraits ne se trouvent pas dans les mêmes proportions à toutes les profondeurs; les extraits au pyrophosphate augmentent lorsqu'on passe de A₁₁ à A₁₂ et AB, les extraits à la soude dans le même temps diminuent; parallèlement à ces variations on assiste à un net accroissement des proportions d'acides humiques dans les extraits au pyrophosphate. L'humus des horizons A₁₂ et AB est donc plus riche en acides humiques que celui de l'horizon A₁₁. Or, au niveau de A₁₂-AB, non seulement le taux de carbone total est peu différent de celui de A₁₁, mais il est souvent même supérieur. On a donc un maximum absolu d'acides humiques (essentiellement acides humiques pyrophosphate) à la base de l'horizon A, et non pas dans la couche la plus superficielle du sol comme on pourrait s'y attendre.

Le restant du carbone des horizons A (c'est-à-dire 50 % du carbone total) se distribue entre l'humine et les acides fulviques libres. Les proportions d'humine ne sont relativement élevées qu'à proximité de la surface du sol; elles diminuent progressivement et deviennent très faibles à la base de A. Les acides fulviques libres, au contraire, sont peu représentés en surface, mais leur proportion croît fortement en profondeur.

Dans l'horizon B l'humus est beaucoup plus pauvre en formes alcalino-solubles; on y observe une baisse très nette des acides humiques extraits au pyrophosphate en particulier. Les proportions d'humine se maintiennent très faibles (de l'ordre de 30 % du carbone total). La fraction importante est la fraction acides fulviques libres.

Dans ce type de sol, la transformation des matières végétales est rapide et totale; on a donc une matière organique bien évoluée. L'humus qui se forme est facilement extractible, riche en acides fulviques, riche en acides humiques extraits au pyrophosphate, pauvre en humine. Globalement, il doit donc être considéré comme peu condensé. Le profil humique indique d'autre part que les substances humiques ont tendance à s'accumuler en A₁₂-AB. On peut penser à une accumulation relative due à une biodégradation plus active en surface qu'en profondeur. Il s'agirait plutôt d'un phénomène de migration. En effet, étant donné le faible état de condensation de l'humus, certains composants ou précurseurs devraient avoir le temps de migrer assez profondément avant d'être immobilisés. Le fait, de plus, que le niveau d'accumulation maximum soit très pauvre en humine est un argument en faveur d'une accumulation par migration.

2.3.2.2. Sols du type III : profil MRS 2

La terre fine de ce sol renferme également très peu de matières légères : moins de 1 % carbone total, sauf dans les 5 premiers centimètres où la proportion atteint 2 %.

La différence de composition entre l'humus de l'horizon A et celui de l'horizon B est encore marquée, mais elle n'est plus aussi nette qu'elle n'était dans le profil GRS 11.

L'humus des horizons A et AB a, à peu près, la même composition. Il contient peu d'acides fulviques libres (10 % du carbone total) et des proportions moyennes d'humine (40 % du carbone). Il est riche en substances alcalino-solubles (50 % du carbone), surtout en acides humiques, acides humiques extraits au pyrophosphate principalement. On peut remarquer que les proportions d'acides humiques extraits au pyrophosphate s'accroissent légèrement à la base de A tandis que celles de l'humine diminuent. Ces variations sont minimales mais vont dans le sens de ce qui a été noté à propos du profil GRS 11.

Dans B et BC les acides fulviques libres n'augmentent que légèrement. Les formes alcalino-solubles perdent peu à peu leur importance et l'humine devient la fraction prédominante avec 50 % du carbone total.

Il s'agit là encore d'un sol à matière organique très évoluée. La transformation des matières végétales est complète; elle conduit à la formation d'un humus qui reste facilement extractible, au moins dans les horizons A. Malgré quelques ressemblances, les différences avec le profil GRS 11 sont importantes : il y a beaucoup moins d'acides fulviques et nettement plus d'humine, l'humus est donc ici plus condensé.

2.4. Le pH

Les sols du type I et II ont un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ acide : pH 5 pour les premiers, pH 4, 5 à 5,0 pour les seconds. Les pH_{KCl} sont nettement plus bas : pH 3,8 - 4,0. Dans le profil les variations sont très faibles (fig. 11 : GRS 3 et GRS 11).

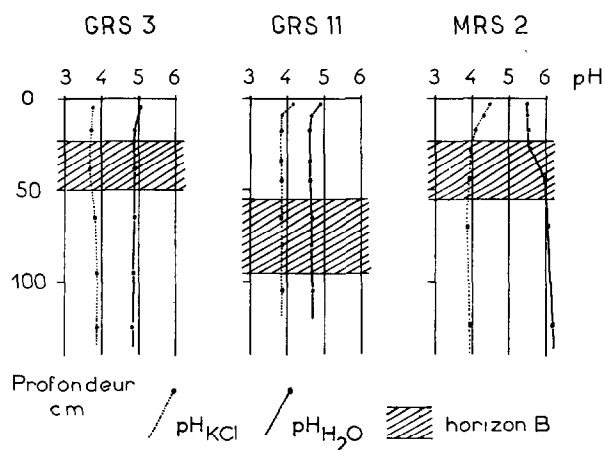


FIG. 11. — Le pH des sols.

Les sols du type III sont moins acides que les précédents (types I et II). Leur $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ est de 5,5 dans les horizons A, 6 dans B et 6,5 dans BC et C. Le pH_{KCl} par contre reste très bas : pH 4 à 4,5 dans A; 3,5 à 4 dans BC et B.

Les sols sur granite (types I et II) sont donc très acides, les sols sur gneiss (type III) moyennement acides. Dans tous les cas l'acidité d'échange est forte.

2.5. Le complexe absorbant

Les principales données relatives au complexe absorbant ont été réunies et présentées sous forme de graphique dans la figure 12. Il s'agit de résultats obtenus sur la terre fine.

La *capacité d'échange* (T) des sols des types I et II est de l'ordre de 10 mé/100 g. Elle est inférieure à cette valeur dans BC et surtout C. Elle est aussi plus faible en A qu'en B. Elle tend donc à varier avec les taux d'argile. Celle des sols du type III est en moyenne plus élevée. Elle atteint des valeurs de 15 mé/100 g et ne présente pas de variations significatives dans le sol proprement dit; elle décroît de façon sensible à la base des profils.

La *somme des bases échangeables* (S) est très faible dans les sols des types I et II. Dans le premier type, S ne dépasse pas 2 mé/100 g en surface. La diminution est rapide en profondeur et en C les valeurs sont extrêmement basses (moins de 0,5 mé/100 g). Les sols du type II sont à peine plus riches; ils contiennent 3 à 4 mé/100 g en surface, 1 à 1,5 dans B et C. Dans les deux cas, le calcium est le cation le mieux représenté; le potassium vient ensuite. Dans les sols du type III, les bases échangeables sont plus abondantes : il y a 7 à 8 mé/100 g où le calcium intervient pour plus de 80 %. La somme des bases est à peu près constante dans A et B; elle augmente légèrement dans BC, mais ne dépasse pas 9 mé/100 g, même dans C.

Le *taux de saturation du complexe absorbant* (V) est donc très faible dans les sols du type I et II (de l'ordre de 10 % pour les premiers, de 20 % pour les seconds), moyen dans les sols du type III (50 % dans les horizons A et B). Dans ces derniers la saturation du complexe augmente rapidement en profondeur et atteint 100 % dans l'horizon C.

L'*aluminium échangeable* est toujours présent. Il est très abondant dans les sols des types I et II. Les taux peuvent être faibles en surface mais ils sont généralement élevés à la base de A et dans B, de l'ordre de 4 à 6 mé/100 g; ils se maintiennent à ces niveaux dans BC et C. Dans les sols du type III, les teneurs en aluminium échangeable sont bien moindres. Il n'y a que très peu d'aluminium échangeable en A, exceptionnellement en C; on en trouve par contre en B et surtout à

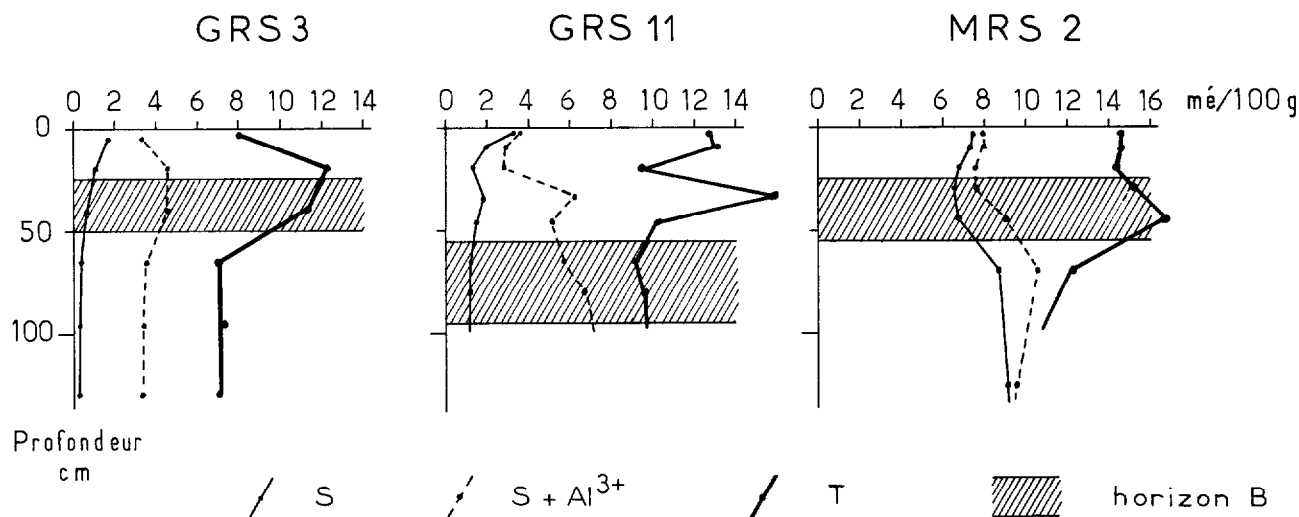


FIG. 12. — Le complexe absorbant et l'état de saturation dans les profils.

la base de B et BC (Fig. 12 : MRS 2).

Du point de vue du complexe absorbant nous avons donc affaire à deux groupes de sols distincts. Un premier correspond aux sols des types I et II sur granites, qui sont fortement désaturés et où l'aluminium domine largement dans les sites d'échange. Le second, formé par les sols du type III sur gneiss, est moins désaturé ; il y a dans ces cas beaucoup plus de calcium que d'aluminium sur le complexe.

2.6. Les oxydes et hydroxydes de fer

Profils du type I

Le taux de Fe_2O_3 total est de 3 à 6 % de terre fine (fig. 13 : GRS 3). Il y a 5 à 6 % de Fe_2O_3 total dans C et BC, parfois un peu plus dans B. Dans A les teneurs deviennent plus basses (3 à 5 %). Une proportion importante de ce fer (70 à 80 %) se trouve sous forme libre. Cette proportion varie peu et de façon non significative dans le profil. Une très petite fraction du fer (0,5 % de Fe_2O_3) est sous forme facilement soluble (fig. 14 : GRS 3). Cette forme, mal cristallisée, ou très divisée, se retrouve dans tous les horizons du sol à peu près dans les mêmes proportions.

Profils du type II

Les teneurs en fer total sont du même ordre que dans le type de sol précédent mais les variations dans les profils sont beaucoup plus accentuées. Les valeurs les plus élevées se rencontrent dans l'horizon BC (5 à 7 % de Fe_2O_3). Il y a diminution régulière dans B, puis dans A où les taux se maintiennent constants (2-3 %

de Fe_2O_3). Une partie non négligeable du fer se trouve sous forme libre (fer libre/fer total : 60 à 70 %). Le rapport fer libre/fer total est sensiblement le même dans tout le profil. Il existe aussi une forme du fer facilement extractible (fig. 14 : GRS 11) dont le taux, 1 % de Fe_2O_3 , est à peu de choses près identique dans tous les horizons.

Profils du type III

Il y a 6 à 7 % de Fe_2O_3 total dans le matériau d'altération. Les taux restent les mêmes jusqu'à la base de B. Dans B ils décroissent régulièrement et en surface il

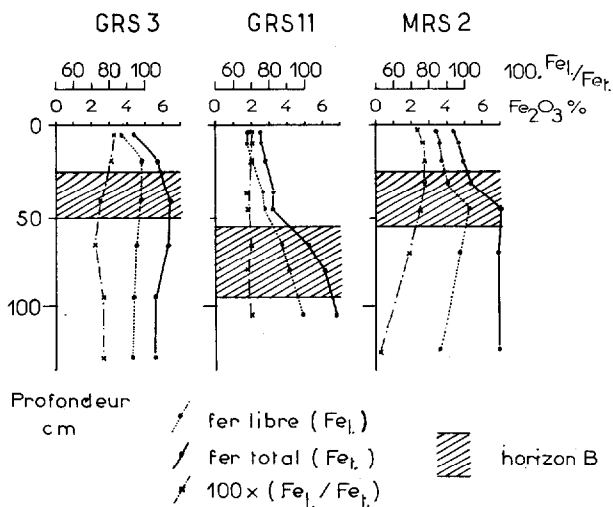


FIG. 13. — Le fer dans les profils : fer libre et fer total.

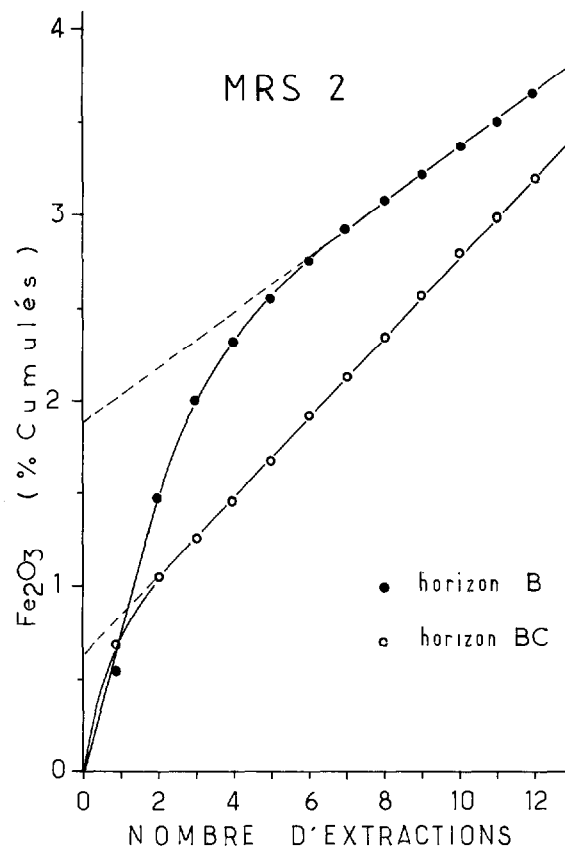
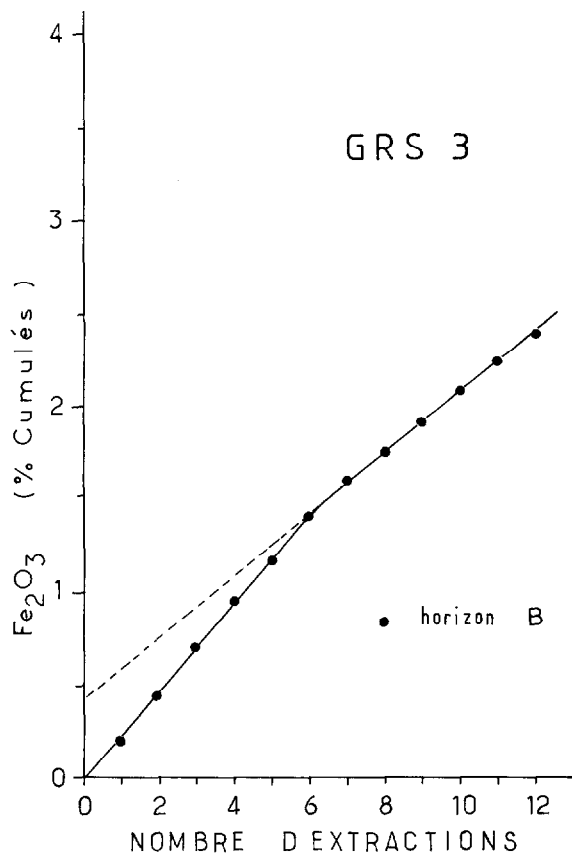
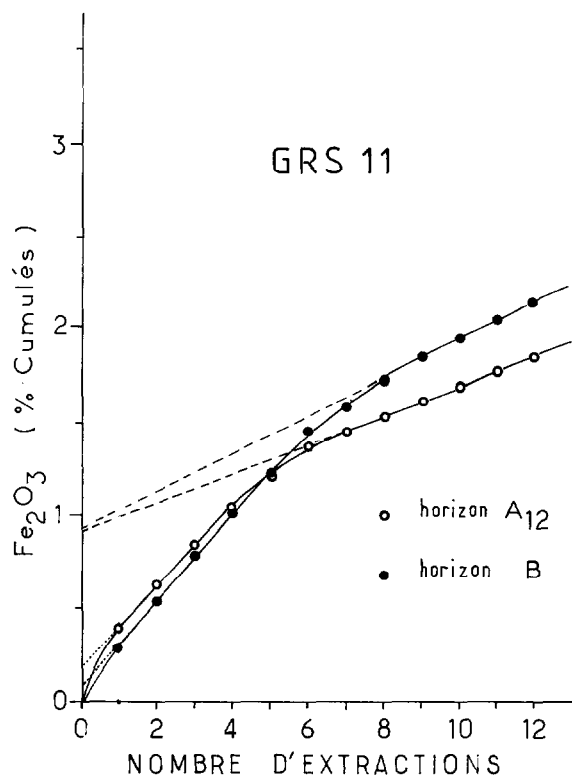


FIG. 14. — Cinétique de la dissolution du fer par l'acide Chlorhydrique 4N dans les sols.



ne sont plus que de 3 à 4 %. Il y a très peu de fer libre dans l'horizon C (moins de 50 % du fer total); les proportions augmentent régulièrement de C vers B puis se maintiennent en B et A aux environs de 65-75 % du fer total. Une partie du fer est très facilement soluble. Les courbes de dissolution dans l'acide chlorhydrique (fig. 14 : MRS 2) montrent qu'il s'agit d'une forme probablement amorphe; les taux sont faibles dans C et BC (0,5 % de Fe₂O₃), mais deviennent assez élevés dans B (2 %).

Les sols des types I et II sont donc des sols relativement riches en fer. Ce fer se trouve surtout sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes qui apparaissent déjà individualisés dans l'horizon C. Dans l'arène, taux de fer, rapport fer libre/fer total ont, en effet, déjà les valeurs qu'ils garderont dans le sol (4 à 6 % de Fe₂O₃ dont 70-80 % sous forme libre). Il y a d'autre part un appauvrissement en fer dans le profil qui semble parallèle à celui de l'argile. Les données disponibles ne permettent cependant pas de dire s'il est plus, ou moins, prononcé pour le fer que pour l'argile.

Les sols du type III sont également des sols riches en fer. Dans C la plus grande partie de ce fer est encore dans les minéraux primaires de la roche ou inclus dans les réseaux des argiles ferrières néoformées. Dans l'horizon B, au contraire, une proportion importante du fer se trouve sous forme d'hydroxydes libres, probablement mal cristallisés, voire même amorphes.

2.7. L'aluminium extractible

Le mélange acide oxalique-oxalate d'ammonium (réactif de Tamm) utilisé pour la dissolution du « fer libre », solubilise aussi de l'aluminium. Les quantités ne sont pas négligeables (Tabl. IV).

TABLEAU IV

Taux moyens d'aluminium solubilisé par le réactif de Tamm avec irradiation aux UV dans les horizons successifs des trois types de sols étudiés

Horizon	Sols du type I	Sols du type II	Sols du type III
	Al ₂ O ₃ ‰	Al ₂ O ₃ ‰	Al ₂ O ₃ ‰
A	1,0	2,0	1,4 - 2,5
B	2,0 - 2,5	2,0 - 3,0	2,0 - 3,0
C	1,0 - 1,5	1,5	1,0 - 1,5

Dans les sols du type I et II, on observe un maximum dans l'horizon B. Dans les sols du type III, il y a peu de différence entre A et B. Il semble donc y avoir une relation entre la quantité d'aluminium extraite et les taux d'argile. Cet aluminium a certainement des origines variées. Il peut s'agir d'aluminium libre, d'aluminium des espaces interfoliaires des argiles, ou d'aluminium extrait des structures, tant des argiles que d'autres minéraux primaires, comme des feldspath en voie d'altération, attaqués par les réactifs de Tamm.

Lors des attaques alternées par HCl et NaOH (analyse des amorphes) des quantités non négligeables d'aluminium sont également dissoutes. La cinétique de la dissolution de l'aluminium présente des similitudes avec celle du fer (fig. 15). Les courbes cumulatives de dissolution indiquent en effet la présence d'aluminium facilement extractible (à dissolution linéaire). Le maximum d'extraction se trouve toujours en B. Il y a très peu d'amorphes, et 1 à 1,5 ‰ d'Al₂O₃ facilement extractible, dans les sols du type I; un peu plus d'amorphe (0,5 à 1 ‰ d'Al₂O₃ et environ 1,5 ‰ d'Al₂O₃ facilement extractible dans les sols du type II. Dans les sols du type III, les extractions sont encore plus importantes : 2-4 ‰ d'Al₂O₃ amorphe et 3-4 ‰ d'Al₂O₃ facilement extractible.

Enfin, comme nous l'avons signalé, il existe de l'aluminium extractible par KCl N (aluminium échangeable). Lorsqu'on étudie la cinétique de la dissolution de l'aluminium dans KCl, on constate généralement une dissolution d'abord rapide qui correspond au passage en solution des formes que l'on

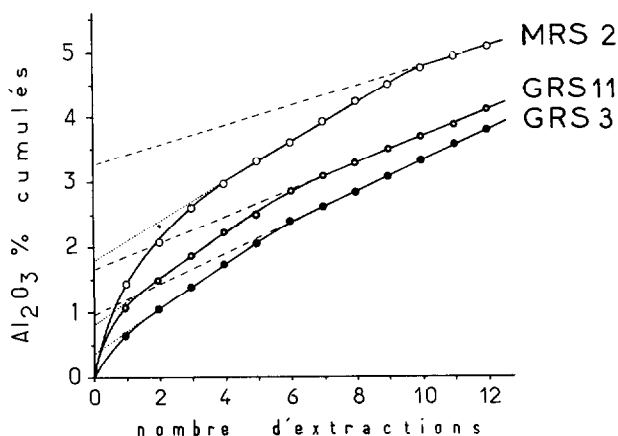


FIG. 15. — Cinétique de la dissolution de l'aluminium par attaques alternées acide chlorhydrique 4N et soude 0,5N dans les horizons B de 3 sols.

considère comme échangeables, puis une dissolution linéaire. On aurait d'abord échange, ensuite dissolution vraie. L'aluminium échangeable a déjà été discuté. L'aluminium soluble dans KCl est variable dans un même profil. On apprécie son importance relative, à un niveau donné, par la pente de la droite de dissolution. Généralement la pente est nulle ou presque nulle dans C (fig. 16); elle est maximale dans B, ou A₁₂ lorsque ce dernier existe comme dans les sols du type III. En A, la pente est plus ou moins forte suivant les sols : elle est moyenne dans les sols des types I et II,

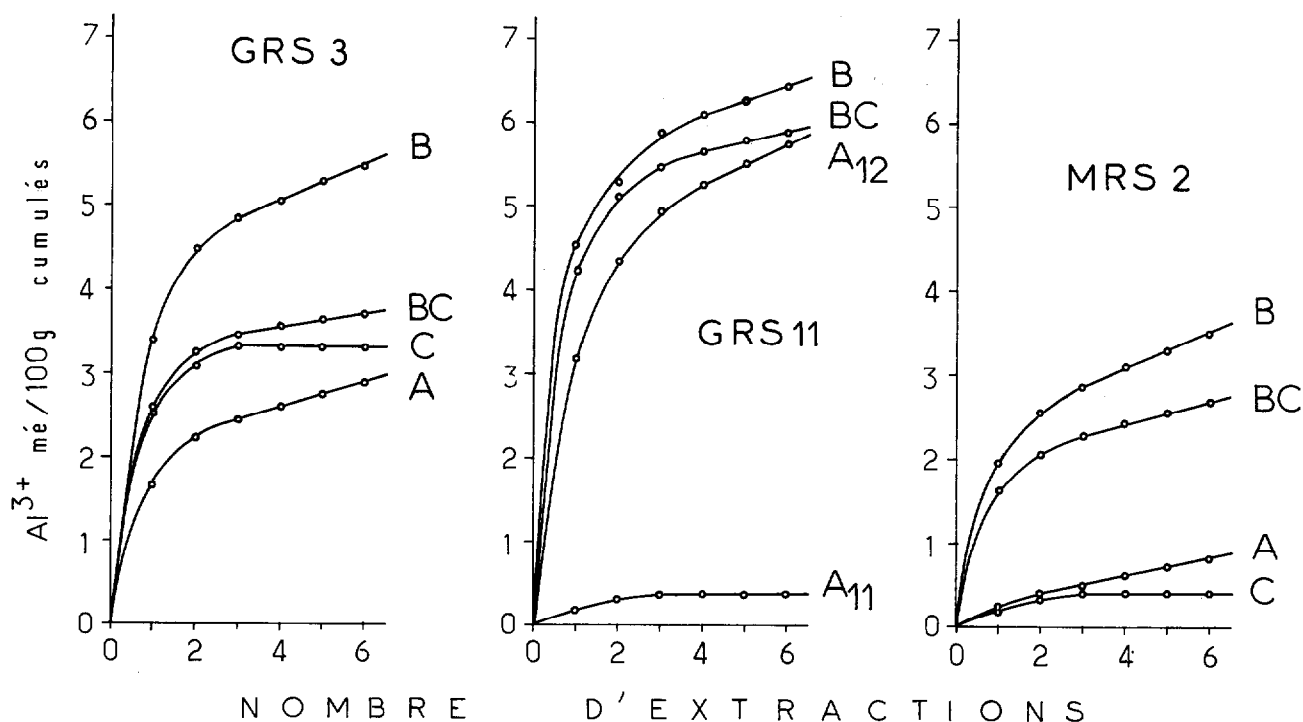


FIG. 16. — Cinétique de la dissolution de l'aluminium dans le chlorure de potassium N dans les principaux horizons des 3 types de sols.

faible dans les sols du type III. On met donc ainsi en évidence une forme d'aluminium caractéristique du sol et qui est surtout représentée en B.

On voit donc que, dans les trois types de sols étudiés, il existe de l'aluminium mis en solution par des réactifs complexants (réactif de Tamm), ou par une attaque acide-base ménagée, ou par un sol neutre (KCl). Cet aluminium extractible paraît s'individualiser dans le sol. On assisterait donc à une aluminisation purement pédologique. Cette constatation rejoint tout à fait les conclusions de l'étude minéralogique. On a en effet montré qu'il y avait une aluminisation caractéristique des espaces interfoliaires des argiles micacées dans le sol.

Une partie de l'aluminium individualisé semble se maintenir sous une forme très facilement soluble (amorphe ou soluble dans KCl), voire même échangeable.

Dans les trois sols on note la même tendance à une légère redistribution de l'aluminium dans le profil. Il y a toujours un maximum en B ou à la base de A. Ce sont les formes les plus facilement extractibles (échangeables d'abord, solubles dans KCl ensuite) qui seraient les plus mobiles; elles sont en effet peu abondantes en A et paraissent s'accumuler à la base de A et en B.

3. CONCLUSION

On pourrait penser que les sols observés sous une végétation de prairie dans le massif cristallin du Rio Grande do Sul aient des points communs avec les brunizems connus non loin de là sous la même prairie en Uruguay et en Argentine. Par leur morphologie, ils présentent d'ailleurs certaines ressemblances avec les brunizems : épaisseur, « isohumisme », couleur brune des horizons B. L'analyse de quelques cas considérés comme représentatifs montre cependant qu'ils en diffèrent profondément. Ce sont en effet des sols acides, fortement désaturés en bases et minéralogiquement évolués.

Sur le terrain on avait séparé trois types morphologiques différents. En fait, l'étude attentive des données analytiques conduit, si l'on se place dans une optique pédogénétique, à distinguer d'une part les sols sur granite et d'autre part les sols sur gneiss.

Les sols sur granite se définissent de la façon suivante : sols de profondeur moyenne, à profil ABC, se développant à partir d'une arène constituée de quartz grossiers et de feldspaths. Dans le sol, les feldspaths disparaissent et on assiste à une forte argilification par formation de kaolinite; on peut aussi trouver de petites quantités d'argiles micacées (micas, illites). Les

hydroxydes de fer s'individualisent dans l'arène et se maintiennent dans le profil. Le sol, comme l'arène, sont fortement désaturés; le pH est acide, le complexe absorbant très aluminisé. Il s'agit de sols humifères à humus bien évolué mais peu condensé et à C/N élevé. On note d'autre part une nette tendance au lessivage de l'argile.

Du point de vue de la dynamique géochimique on se trouve dans des conditions d'altération hydrolytiques ménagées avec kaolinisation et ferruginisation. Les minéraux primaires les plus fragiles (plagioclases) disparaissent rapidement à la base de l'arène mais les feldspaths potassiques, plus résistants, se maintiennent. Ce n'est que dans le sol qu'ils sont massivement altérés. Leur altération fait alors probablement intervenir la matière organique. En effet, à cause de l'acidité et des conditions climatiques de la région (températures peu élevées en particulier), la minéralisation de l'humus est ralentie; il se forme des substances humiques qui se maintiennent à l'état peu condensé, car ni les facteurs climatiques (absence de saison sèche), ni le milieu physico-chimique ne se prêtent à leur polymérisation. Il n'y a pas de maturation selon la conception de DUCHAUFOR (1977). Un tel humus est très agressif vis-à-vis des minéraux (RAZZAGHE, 1976). Dans ces conditions, au niveau du sol, l'acidolyse prenant le relais de l'hydrolyse, il y a destruction des feldspaths et néogenèse de kaolinite. C'est probablement aussi à l'effet acidifiant de la matière organique que l'on doit l'aluminisation des espaces interfoliaires des argiles micacées (RAZZAGHE et ROBERT, 1975).

L'acidité, conséquence de la totale élimination des bases, ainsi qu'un climat frais et continuellement humide, expliquent la formation d'une matière organique « agressive » qui est à l'origine des phénomènes d'acidolyse et d'aluminisation.

L'aluminium individualisé stabilise l'humus peu polymérisé (HETIER, 1975), d'où l'accumulation humifère dans les profils. Il semble d'autre part que cet aluminium subisse une très légère redistribution verticale. Rien cependant n'indique une podzolisation caractérisée; la mobilité des fractions organiques n'est pas suffisante parce que le sol est trop argileux et peut-être aussi trop riche en fer (DUCHAUFOR, 1972). L'humus paraît seulement aider la mise en mouvement de l'argile.

En ce qui concerne la classification, les sols sur granite correspondent assez bien aux concepts « solo podzolic vermelho-amarelo » de la classification brésilienne, équivalent du « Red-yellow Podzolic soil » de la classification BALDWIN, KELLOG, THORP (THORP et SMITH, 1949), « acrisol » de la légende F.A.O., « ultisols » de la soil taxonomy et c'est dans ces grandes catégories qu'ils sont généralement

classés. S'agit-il de sols ferrallitiques, de sols ferrallitiques humifères? Leur minéralogie rappelle celle des sols ferrallitiques, mais leurs caractéristiques morphologiques (épaisseur, structure, contraste des horizons) sont tout autres. De plus l'altération différentielle qui s'observe à l'échelle du profil s'oppose nettement à l'altération brutale et simultanée de tous les minéraux, caractéristique des milieux ferrallitiques typiques. Les différenciations minéralogiques les rapprochent des sols ferrugineux tropicaux (PAQUET, 1970); elles les apparentent surtout aux sols dérivés des arènes granitiques européennes (DEJOU *et al.*, 1977), aux sols bruns acides en particulier (SOUCHIER, 1971); les néogenèses sont seulement ici beaucoup plus fortes et l'individualisation du fer est plus marquée. Pratiquement, si l'on se réfère aux définitions habituelles (CPCS, 1967), les sols sur arènes granitiques du Rio Grande do Sul ne peuvent être considérés ni comme sols bruns (sols brunifiés), ni comme sols ferrugineux tropicaux. Ils sont à classer plutôt comme fersiallitiques puisqu'ils proviennent d'une altération hydrolytique poussée sans qu'il y ait la desilicification prononcée qui caractérise les milieux ferrallitiques. Ce seraient donc des *sols fersiallitiques désaturés humifères*.

Le type de *sol sur gneiss* est aussi un sol moyennement profond. Il présente la séquence d'horizons ABC et se développe dans un matériau d'altération très riche en minéraux primaires. L'altération est du type fersiallitique, puisque la néogenèse argileuse est relativement importante avec formation d'un mélange de kaolinite et d'argiles 2/1 représentées par des smectites et des vermiculites. Les smectites disparaissent dans le sol; les vermiculites au contraire se concentrent en B. En A apparaissent des interstratifiés mica-vermiculite. Il y a une ferruginisation progressive dans la zone d'altération et, dans le sol, le fer se trouve en grande partie sous forme libre. Le profil (les horizons A et B) est relativement désaturé (S/T de l'ordre de 50 %) alors que l'horizon C reste saturé. La désalcalinisation n'est donc ici que partielle, ce qui se traduit par des pH pas trop acides.

L'accumulation humifère est la caractéristique importante de ce sol. L'horizon A est épais, assez finement structuré. La matière organique est bien évoluée (du type mull), mais le rapport C/N et les proportions de fractions humiques facilement extractibles sont encore élevées.

On trouve de l'aluminium échangeable, de l'aluminium facilement extractible; les espaces interfoliaires des argiles 2/1 sont aluminisés. Tout ceci est l'indication d'une acidolyse qui est à mettre au compte du type d'humus, bien que le pH ne soit pas dans ce cas très acide. Dans ce sol l'humus paraît également responsable d'une mauvaise cristallo-genèse des phyllites et des hydroxydes.

Cette catégorie de sols sur gneiss est classée au Brésil comme brunizem. Leur étude montre qu'il ne s'agit pas à proprement parler de brunizems mais de sols de transition. Les horizons superficiels présentent en effet des caractéristiques analytiques qui les placent exactement en position intermédiaire entre des épipédons molliques et des épipédons umbriques. D'autre part la désaturation déjà prononcée du complexe absorbant, le type d'humus, la nature de la fraction argileuse, montrent que l'évolution pédogénétique va dans le sens de celle que nous avons décrite pour les sols sur granites : fersiallisation et accumulation humifère acide. C'est pourquoi nous pensons que les sols sur gneiss doivent être considérés, et classés, comme *termes de transition entre les brunizems et les sols fersiallitiques désaturés humifères*.

On constate ainsi que, sur socle cristallin, sous climat sub-tropical humide de transition vers le climat tempéré, sous végétation de prairie, la pédogenèse est fersiallitique mais d'un type fersiallitique particulier

puisqu'elle conduit à la formation de sols acides et humifères. Le caractère fersiallitique est d'autant plus accusé que la roche est plus acide.

L'accumulation de la matière organique, l'acidification superficielle et ses conséquences, paraissent des phénomènes parfaitement en équilibre avec les conditions actuelles. Il y a un doute en ce qui concerne les altérations. Les arènes, en particulier, auraient pu se former sous d'autres conditions climatiques et la kaolinite pourrait être, au moins en partie, héritée. L'existence possible de tels héritages ne modifie cependant en rien nos conclusions quant à l'évolution actuelle et la classification des sols.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pour son support financier.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 10 décembre 1979.

BIBLIOGRAPHIE

- ALONSO (M.T.), 1977. — *Vegetação in : geografia do Brasil : Região Sul*. Vol. 5, I.B.G.E., Rio de Janeiro : 81-109.
- BRÉSIL, 1969. — *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*. Ministério da Agricultura. Comissão de Solos. Rio de Janeiro, 634 p.
- BRÉSIL, 1969. — *Normais climatológicas*. Vol. IV. Ministério da Agricultura. Escritório de Meteorologia. Rio de Janeiro, 73 p.
- BRÉSIL, 1972. — *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina*. Universidade de Santa Maria. Revista do Centro de Ciências Rurais, Vol. 2, n° 1 à 4. Santa Maria (RS), 494 p.
- BRÉSIL, 1973. — *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul*. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisas Agropecuárias. Divisão de Pesquisa Pedológica. Recife, 431 p.
- BRÉSIL, 1974. — *Carta geológica do Brasil ao milionésimo : folhas Uruguaiana-Porto Alegre*. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília.
- CPCS, 1967. — *Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Classification française*. Document provisoire de l'Ecole Nationale Sup. Agron. Grignon, 87 p.
- DABIN (B.), 1971. — *Etude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol*. *Sc. du Sol* 1 : 47-63.
- DEJOU (J.), GUYOT (J.) et ROBERT (M.), 1977. — *Evolutions superficielles des roches cristallines et cristallophylliennes dans les régions tempérées*. Institut Nat. de la Recherche Agronomique, Paris, 464 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1972. — *Processus de formation des sols*. Biochimie et géochimie. C.R.D.P., Nancy, 184 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1977. — *Pédologie et classification in Pédologie*. Direc. Duchaufour et Souchier, Vol. I, Masson Paris, 477 p.
- HETIER (J.M.), 1975. — *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse Fac. Sc. de Nancy, 194 p., *multigr.*
- NIMER (E.), 1977. — *Clima in : geografia do Brasil : região Sul*. Vol. 5. I.B.G.E., Rio de Janeiro : 35-79.
- PAQUET (H.), 1970. — *Evolution géochimie des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saisons contrastées*. *Mém. Serv. carte géol. Alsace Lorraine*, n° 30. Strasbourg, 212 p.
- PEGUY (Ch.), 1970. — *Précis de Climatologie*. Masson, Paris, 468 p.
- RAZZAGHE-KARIMI (M.) et ROBERT (M.), 1975. — *Altération des micas et géochimie de l'aluminium : rôle de la configuration de la molécule organique sur l'aptitude à la complexation*. *C.R. Ac. Sc. Paris t. 280 D.* : 2.645-2.648.

- RAZZAGHE-KARIMI (M.), 1976. — Contribution à l'étude expérimentale des phénomènes d'altération en milieu organique. Thèse Fac. Sc. Paris VI, 222 p., *multigr.*
- ROBERT (M.) et TESSIER (D.), 1974. — Méthode de préparation des argiles des sols pour les études minéralogiques. *Ann. Agron.*, 25 (6) : 859-882.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.
- SEGALEN (P.), 1970. — Extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode de De Endredy par irradiation à l'ultraviolet de solutions oxaliques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 4 : 483-496.
- SOUCHIER (B.), 1971. — Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). *Mém. Serv. Carte géol. Alsace Lorraine*, n° 33. Strasbourg, 134 p.
- THORP (J.) et SMITH (G.D.), 1949. — Higher categories of soil classification. Order, suborder and great soil groups. *Soil Sc.*, 67 : 117-126.